
Etude du comportement d'une marne argileuse traitée à la chaux pour son réemploi dans la construction d'un remblai routier

Cas de l'autoroute Est-Ouest Tronçon Oued Fodda/Khemis Miliana (Algérie)

Fatima Mellal* — Belkacem Lamri*

** Université Hassiba Benbouali de Chlef, Route de Sendjas, BP 161, Chlef, Algérie, fatima_m8@live.com, lamri_belkacem@yahoo.com*

RÉSUMÉ: Une méthodologie expérimentale a été développée pour la construction d'un remblai routier avec des marnes traitées à la chaux. L'opération du compactage des couches du sol s'effectue à l'Optimum Proctor(OPM) ou du côté de l'OPM humide, ce qui implique que le sol se trouve dans un état quasi saturé (degré de saturation supérieur à 90%).

Une application du traitement à 2% de chaux a été exécutée pour la construction du remblai localisé au niveau d'un axe secondaire de l'autoroute Est – Ouest. Une série d'essais a été établie pour contrôler l'exécution et le compactage des couches. Les résultats obtenus sur chantier sont confrontés aux résultats de l'étude au laboratoire.

ABSTRACT: An experimental methodology was developed for the construction of a road embankment with marl treated. The operation of the compaction of soil layers occurs at the optimum Proctor (OPM) or the OPM COTED wet, which means that the soil is in a quasi-saturated state (degree of saturation above 90%). An application of treatment to 2% lime was performed for the construction of the embankment located at a secondary axis of the east - west. A series of tests has been established to monitor implementation and compaction layers. The results obtained on site face the results of the study in the laboratory

MOTS-CLÉS: Comportement, sol non saturé, marne argileuse, traitement, chaux éteinte.

KEYWORDS: Behaviour, unsaturated soil, marl clay, treatment, slaked lime

1. Introduction

Le domaine des sols non saturés couvre les ouvrages réalisés par compactage tel que les remblais, les digues, les barrages et les barrières minérales d'étanchéité des centres de stockage de déchets. Le but de notre travail est d'étudier le comportement de la marne provenant des déblais, traités avec différents pourcentages de chaux, destiné pour la construction d'un remblai d'un axe secondaire de l'autoroute Est-Ouest. L'ajout de la chaux aux sols argileux permet de réduire leur sensibilité à l'eau par une augmentation immédiate de la limite de plasticité, de la limite de retrait et de la teneur en eau optimale, d'une réduction de l'indice de plasticité et de retrait, de la valeur au bleu de méthylène et de la masse volumique sèche, et une conservation de la limite de liquidité (Kolias et al., 2005 ; Yucel et al., 2007). A long terme la chaux implique une augmentation de l'indice CBR, de la résistance à la compression R_c , des paramètres de cisaillement (cohésion C et angle de frottement interne Φ) et une diminution des paramètres de compressibilité, du potentiel et de la pression de gonflement (Kolias et al., 2005 ; Yi et al., 2006 ; Raymond et al., 2007 ; Deneele, 2008). L'amélioration du comportement des sols traités est justifiée par la présence des réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux hydratée (Raymond et al., 2007).

2. Matériaux

2.1 Sol (la marne)

Dans notre étude, on a choisi des matériaux provenant des zones de déblai situées au PK 3+900 du tronçon de l'autoroute section des 27 Km mis en dépôt au PK 5+800. Les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont regroupées dans le tableau 1. La quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) peut classer la marne comme étant une marne argileuse.

$\%>80\mu\text{m}$	WL (%)	IP (%)	IR (%)	VB (g/kg)	CBR	DG (%)	FR (%)	(CaCO_3) (%)
70	60	32	34	6.5	3.3	12	8.3	21.2

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques et mécaniques de la marne

Selon le guide des terrassements routiers (Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR 92)), la fraction de la marne inférieure à 50 mm est de la classe A3 et les éléments rocheux (supérieur à 50 mm) sont de la classe R 34 ts. Les matériaux de la classe A3 sont caractérisés par une forte plasticité et un état hydrique très humide et les matériaux de classe R 34 ts sont caractérisés par un état en place surconsolidé semi rocheux avec des états hydriques très secs. Leur réemploi en l'état naturel pour la construction des remblais pose des problèmes délicats au

moment de la mise en œuvre (problème de la haute plasticité qui implique des difficultés de malaxage et de compactage), surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage (risques d'évolution granulométrique dans le temps qui peuvent conduire à des glissements importants).

2.2 La chaux

La chaux utilisée provient de l'usine de Saida, les caractéristiques de cette chaux sont récapitulées dans le tableau 2.

CaO (%)	MgO (%)	80 mm (%)	Teneur en eau libre (%)
73.25	< 4	96	0.5

Tableau 2. *Caractéristiques de la chaux*

Selon les résultats du tableau 2 ainsi que les normes de spécification (NF 196-2, NF 044 – 145), on peut dire que la chaux hydratée de Saida est conforme pour son utilisation dans le traitement des remblais routiers.

2.3 Préparation des mélanges et procédure d'essais

Les quantités de la marne et de la chaux pour la préparation des mélanges sont déterminées selon un pourcentage massique. Les paramètres physiques et mécaniques des mélanges sont déterminés conformément aux normes françaises (NF P94-056 et NF P94-057 pour l'analyse granulométrique, NF P94-051 pour les limites d'Atterberg, NF P94-060-1 pour la limite de retrait, NF P94-068 pour l'essai au bleu de méthylène, NF P94-093 pour les caractéristiques de compactage (Proctor normal et modifié), NF P94-078 pour l'indice portant californien CBR, NF P94-090-1 pour la compressibilité, le gonflement de la marne et la pression de gonflement, NF P94-071-1 pour l'essai de cisaillement).

3. Résultats et discussion

3.1 Effet de la chaux sur les caractéristiques physiques de la marne

Selon le tableau 3 ci-dessous, on remarque que l'augmentation du pourcentage de chaux implique une réduction importante des indices de retrait et de plasticité et de la valeur au bleu. Un pourcentage de 4% de chaux fait réduire les deux indices d'un taux de 50% ainsi que la masse volumique sèche à l'optimum Proctor et une augmentation de la teneur en eau optimale.

Chaux (%)	IP (%)	IR (%)	VB (%)	γ_d (kN/m ³) (OPM)	w (OPM) (%)
0	32	34	6.5	19.4	13.5
1	28	30	6	18.9	13.9
2	20	28	5.3	18.5	14.3
3	18	22	4.5	18.3	15.0
4	15	17	4.7	18.2	15.3

Tableau 3. Variation des caractéristiques physiques de la marne en fonction du pourcentage en chaux additionnée

3.2 Effet de la chaux sur la portance

La figure 1 montre qu'il y a une tendance générale d'accroissement des valeurs du CBR et de l'IPI avec l'augmentation du pourcentage en chaux, un taux de 1% de chaux donne une augmentation de 50% de CBR.

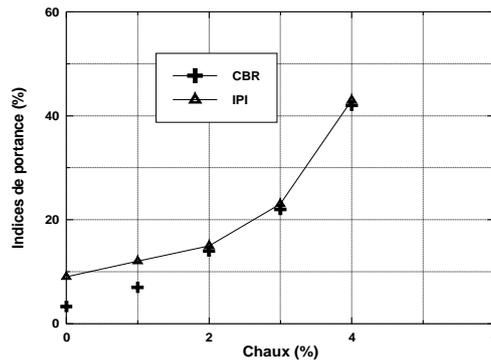


Figure 1. Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction des différents pourcentages de chaux

L'amélioration de la portance de la marne traitée est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de l'additif en chaux.

3.3 Effet de la chaux sur la résistance à la compression des mélanges

La résistance à la compression de la marne à l'état naturel est très faible, elle est de l'ordre de 0.64 MPa.

Selon la figure 2, On remarque que pour une durée de cure nulle (écrasement immédiat), la résistance à la compression garde sa valeur faible pour les différents mélanges.

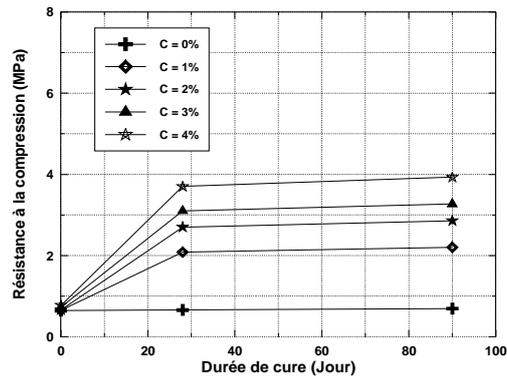
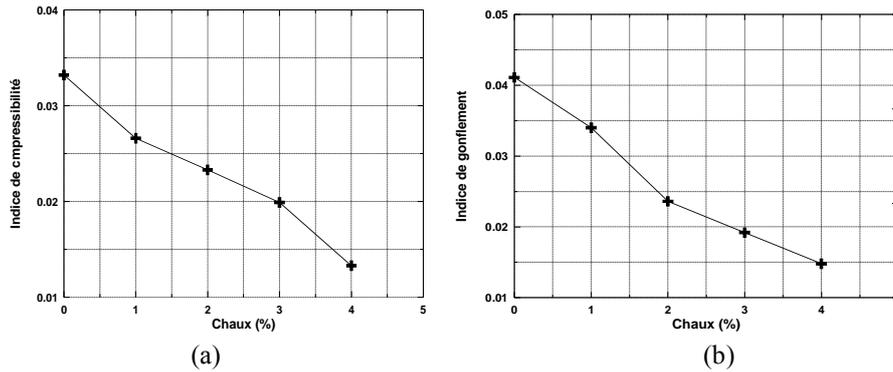


Figure 2. Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné

A partir d'une durée de cure de 28 jours, on constate une évolution importante avec l'augmentation du pourcentage de la chaux puis elle est stabilisée à une durée de cure de 90 jours. La forte augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation de la chaux pendant cette période.

3.4 Effet de la chaux sur la compressibilité

A l'état naturel de la marne étudiée, les valeurs de C_c et C_g sont respectivement 3.32 % et 4.11%, ce qui donne une marne argileuse très peu compressible et gonflante.



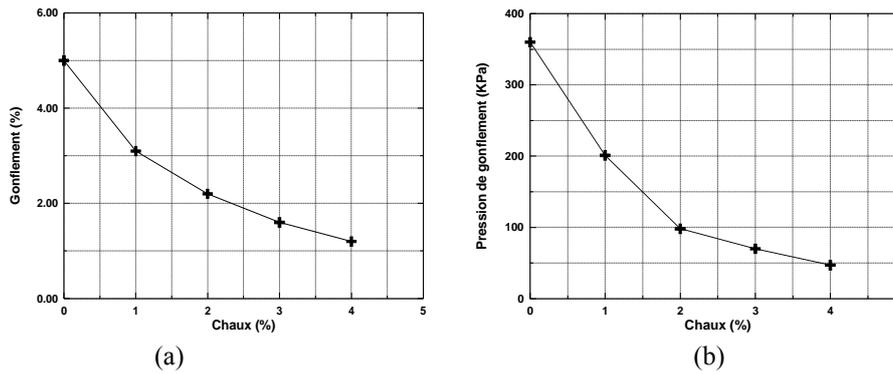
(a) l'indice de compressibilité C_c (b) indice de gonflement C_g

Figure 3. Variation des paramètres de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée

La figure 3 montre une diminution de l'indice de compression et de l'indice de gonflement au fur et à mesure que le pourcentage de chaux augmente. On constate que le sol perd sa sensibilité au gonflement à partir de 1% de chaux.

3.5 Effet de la chaux sur le potentiel et la pression de gonflement

La figure 4 représente la variation du potentiel et de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux additionné ($C = 1, 2, 3$ et 4%).



(a) potentiel de gonflement G (b) pression de gonflement P_g

Figure 4. Variation du potentiel et de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux additionnée

A l'état naturel, la marne possède un potentiel et une pression de gonflement élevés ($G = 5\%$, $P_g = 360$ kPa), donc c'est une marne argileuse gonflante. Selon la figure 4, on observe les paramètres de gonflement qui varient inversement proportionnel avec l'augmentation du pourcentage en chaux ; un mélange traité à 2 % de chaux fait passer la marne de son état gonflant à un état non gonflant avec un potentiel de 2.1% et une pression de 98 kPa.

3.7 Paramètres du cisaillement direct

Les variations de la cohésion et des angles de frottement avec le pourcentage en chaux évaluées immédiatement à 7, 14 et 28 jours sont illustrées dans la Figure 5:

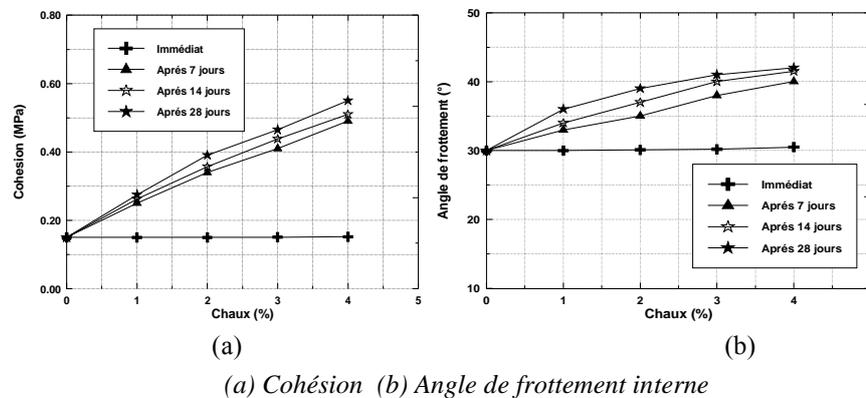


Figure 5. Variation des paramètres de cisaillement en fonction du pourcentage de chaux additionné pour les différentes durées de cure

On remarque une forte amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne des mélanges à durée de cure de 7 jours et une légère augmentation à 14 et 28 jours.

L'amélioration du comportement de la marne traitée est due à la présence des réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux hydratée, des réactions à court terme et à long terme. Des réactions à court terme incluent la floculation, la migration de la chaux hydratée qui résultent de l'amélioration des paramètres géotechniques physiques, tandis qu'à long terme, des réactions pozzolaniques (formation des aluminates et des silicates de calcium hydratés) entraînent une véritable "prise" des matières en contact, comme le ferait un ciment déduit d'une amélioration des paramètres géotechniques mécaniques.

5 Application du traitement

5.1 Présentation du site de traitement

Le projet de construction de l'Autoroute Est Ouest tronçon Oued Fodda - Khemis Miliana prévoit le recours au traitement des sols à la chaux pour la construction du remblai au profit de l'axe secondaire situé au PK 5+800 section des 27 Km coté droit.

L'exécution est faite par épandage des matériaux, un malaxage et un compactage comme indiqué dans la figure 6



(a) *Épandage de la chaux*

(b) *Malaxage*

(c) *Compactage du sol traité*

Figure 6. *Opérations d'épandage, de malaxage et de compactage*

L'épandage des matériaux à traiter est réalisé par les engins de fragmentation mécanique : bulldozers, niveleuses interviennent pour réduire les matériaux à une mouture de classe 0/20 mm sur 30 cm. L'épandage de la chaux se réalise par sac sur le sol préalablement quadrillé (Figure 6 (a)), chaque carré définit la surface sur laquelle un sac complet doit être répandu.

Le malaxage s'effectue immédiatement (1/4 h) après l'épandage de la chaux pour éviter la dispersion de l'agent de traitement par le vent et la perte de réactivité de la chaux (Figure 6 (b)). Il faut veiller à ce que l'humidité du sol après traitement corresponde à l'optimum déterminé par l'étude en laboratoire. Le malaxage s'exécute par des passes longitudinales et transversales successives par : bulldozers, niveleuses, tracteur avec disque. Les opérations d'épandage et de malaxage sont menées de façon à limiter la production de poussière.

Le compactage de la marne traitée demande une attention toute particulière, Il est important que le compactage s'étende à toute l'épaisseur de la couche malaxée (0.3 m à 0.5 m) avec un nombre de passe limite (3 à 4 passes) par un rouleau vibrant (Figure 6 (c)).

5.3 Résultats des essais *in situ* et interprétations

Le contrôle du compactage au niveau de chantier est vérifié par la mesure des deux paramètres importants qui sont la compacité et la portance.

a. Compacité :

Les densités et les teneurs en eau *in situ* sont déterminés au moyen d'un Troxler selon la norme française (NF P 94-061-1). La figure 7 représente la variation de la teneur en eau et la densité sèche *in situ* en fonction du nombre de couches traitées du remblai.

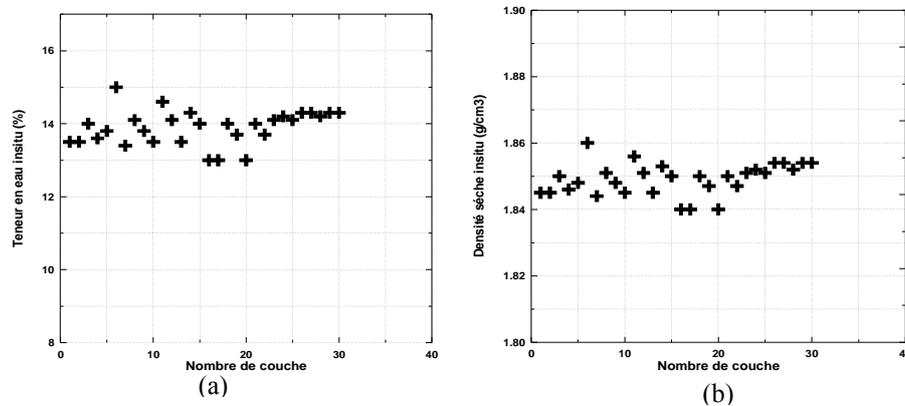


Figure 7. Variation de la teneur en eau (a) et de la densité sèche *in situ* (b) en fonction du nombre de couches

Selon les valeurs mesurées mentionnées, on peut constater que la majorité de ces valeurs sont proches des paramètres à l'Optimum Proctor mesurées au laboratoire ($W_{opt} = 14,3 \%$ et $\gamma_d = 18.45 \text{ kN/m}^3$). On peut dire donc que les compacités visées des couches traitées sont atteintes.

b. Portance :

Les essais de déformabilité sont effectués par le biais d'une plaque de diamètre ϕ 600 mm (NF P94-117-1) sur chaque 3^{ème} couche de remblai. La figure 8 représente la variation du module de déformabilité (module sous chargement à la plaque EV2) en fonction du nombre de couches.

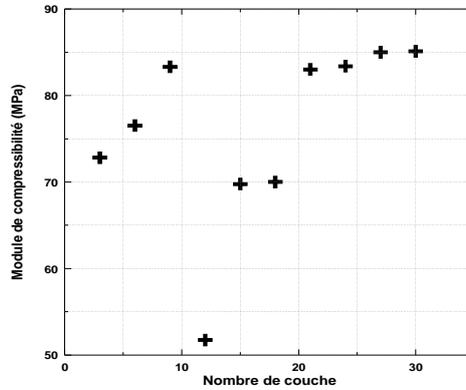


Figure 8. Variation du module de déformabilité en fonction de nombre de couches

Les résultats illustrés par la figure 8 montrent que toutes les valeurs de EV2 sont supérieures à la valeur exigée par le guide géotechnique du traitement (LCPC / Setra, 2000) (la portance des remblais est défini par un module de sous chargement à la plaque EV2 des couches ≥ 40 MPa) ce qui signifie une bonne portance de notre remblai marneux traité.

6. Conclusion

L'application du traitement de la marne sur chantier avec 2% de chaux a confirmé les résultats trouvés au laboratoire. A court terme de la réalisation, on a remarqué que la marne est passée d'un état déformable, collant difficilement compactable à un état rigide, frottant, friable plus facile à travailler. Ce changement d'état est dû à l'amélioration du comportement physique du sol traité (diminution de la plasticité et l'aplatissement de la courbe Proctor). Le contrôle de la compacité et de la portance des couches traitées a donné des résultats fiables. Les valeurs de la densité sèche et les teneurs en eau trouvées in situ à l'aide du Troxler sont généralement proches des valeurs trouvées au laboratoire. Les valeurs du Module de sous chargement à la plaque EV2 qui représente la portance ont été trouvés supérieures à 0.4 MPa. L'amélioration de la portance et de la compacité sont justifiées par l'amélioration du comportement mécanique observé au laboratoire des mélanges (augmentation de CBR augmentation de la cohésion et l'angle de frottement, diminution du gonflement). D'après ces résultats positifs trouvés, on peut dire que les ouvrages géotechniques réalisés à l'aide des sols traités à la chaux dans un état quasi-saturé présentent un bon comportement physique et mécanique.

7. Bibliographie

- Deneele D., «Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités», communication, laboratoire centrale des ponts et chaussés, 2008 .
- Guide Technique., «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques., Application à la réalisation des remblais et des couches de forme», LCPC / Setra, 2000.
- Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou I. V. & Karahalios A., «Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement». *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, 2005, pp.301–313.
- Raymond N., Yong & Vahid O., «Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils», *Applied Clay Science*, vol.35, 2007, pp. 238–249.
- Yi C., Bin S., Charles W. & Chao-Sheng T., «Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil», *Engineering Geology*, vol 87, 2006, pp. 230–240.
- Yucel G., Dursun S. & Murat cetin M., «Impact of cyclic wetting–drying %Mon swelling behaviour of lime-stabilized soil», *Building and Environment*, vol. 42, 2007, pp. 681–688.